

KARAKTERISTIK MEMBRAN ASIMETRIS POLIETERSUFONE (PES) DENGAN PELARUT DIMETIL FORMAMIDE DAN N-METIL-2-PYROLIDONE

(Characteristic of Polyethersulfone (PES) Asymmetric Membrane with Dimethyl Formamide and N-Methyl Pyrrolidone as Solvent)

Sri Mulyati, Fachrul Razi dan Zuhra

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jalan Tgk. Syekh Abdur Rauf No.7, Darussalam Banda Aceh, Indonesia, 23111
e-mail: sri.mulyati@unsyiah.ac.id

Naskah diterima 18 September 2016, revisi akhir 5 April 2017 dan disetujui untuk diterbitkan 7 April 2017

ABSTRAK. Membran yang umumnya digunakan untuk proses pemisahan dapat dibuat menggunakan teknik inversi fasa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik membran asimetris polietersulfone (PES) yang dibuat menggunakan teknik inversi fasa dengan variabel jenis pelarut dan Trans Membrane Pressure (TMP). Hasil analisis Scanning Electron Microscopy (SEM) terhadap morfologi membran membuktikan bahwa membran yang dihasilkan merupakan membran asimetris yang terdiri dari dua lapisan yaitu bagian atas merupakan lapisan tipis dan lapisan bawah adalah lapisan berpori. Membran PES/DMF memiliki struktur pori yang lebih besar dibandingkan membran PES/NMP. Koefisien permeabilitas kedua membran yang dihasilkan berada dalam jangkauan ultrafiltrasi. Koefisien permeabilitas (L_p) membran PES/DMF sebesar $35,769 \text{ L/m}^2\cdot\text{jam}$, nilai ini jauh lebih besar dibandingkan PES/NMP yaitu $15,364 \text{ L/m}^2\cdot\text{jam}\cdot\text{bar}$. Molecular Weight Cut-Off (MWCO) dari membran PES/DMF yaitu 177 Kda sedangkan membran PES/NMP sebesar 186 Kda. Kinerja membran PES/DMF terhadap pemisahan larutan dekstran memberikan nilai fluks yang lebih tinggi daripada membran PES/NMP sedangkan rejeksi yang dihasilkan lebih rendah. Fluks tertinggi diperoleh pada TMP 2 bar sebesar $11,4 \text{ L/m}^2\cdot\text{jam}$ untuk membran PES/DMF dan $10,2 \text{ L/m}^2\cdot\text{jam}$ untuk membran PES/NMP.

Kata kunci: kinerja membran, membran asimetris, Molecular Weight Cut-Off (MWCO), morfologi, permeabilitas

ABSTRACT. Membrane that is generally used for separation process could be made using phase inversion technique. This research aims to create polyethersulfone (PES) asymmetric membranes via phase inversion technique using solvent and Trans Membrane Pressure (TMP) as variable. SEM analysis indicated that membranes had asymmetric structure that consists of two layers which denser skin layer on the top surface and the porous support on the bottom. PES/DMF membrane showed larger pore structure than PES/NMP. The permeability coefficients of both membranes were in the ultrafiltration range. The coefficient permeability (L_p) of PES/DMF membrane was $35.769 \text{ L/m}^2\cdot\text{hour}$, much greater compared to PES/NMP membrane which was $15.364 \text{ L/m}^2\cdot\text{hour}\cdot\text{bar}$. Molecular Weight Cut-Off (MWCO) of PES/DMF membrane was 177 Kda, meanwhile PES/NMP was 186 Kda. Performances of the membranes were evaluated using dextrane as feed solution. PES/DMF membrane resulted in an higher flux and lower rejection than PES/NMP.

Keywords: asymmetric membrane, membrane performance, Molecular Weight Cut-Off (MWCO), morphology, permeability

1. PENDAHULUAN

Proses pemisahan dengan membran telah diaplikasikan di berbagai bidang, diantaranya untuk pemurnian air (He dan Radisav, 2016), pada industri makanan dan obat-obatan (Gierszewska, *et al.*, 2016) dan proses pengolahan limbah industri (Huang, *et al.*, 2015). Berdasarkan struktur, membran dapat dibedakan menjadi membran simetris dan asimetris. Membran simetris mempunyai ukuran dan kerapatan pori yang sama di semua bagian sedangkan membran asimetris terdiri dari lapisan tipis pada bagian atas yang merupakan lapisan aktif tempat pemisahan terjadi serta lapisan bawah yang berpori dan bertindak sebagai penyangga. Lapisan ini tidak mempengaruhi karakteristik pemisahan dan laju filtrasi. Membran asimetris terutama digunakan untuk proses pemisahan yang menggunakan perbedaan tekanan sebagai gaya dorong seperti proses ultrafiltrasi dan reverse osmosis (RO).

Sejak Loeb dan Sourirajan mempublikasikan metode inversi fasa (Kools, 1998), sebagian besar peneliti telah mempelajari tentang mekanisme pembentukan membran. Proses inversi fasa secara presipitasi imersi dikenal sebagai teknik yang paling populer untuk membuat membran asimetris, khususnya membran untuk proses ultrafiltrasi (Mulder, 1996). Pada proses ini membran yang baru dicetak kemudian dicelupkan ke dalam bak koagulasi yang berisi non pelarut yaitu senyawa yang mempunyai afinitas yang tinggi terhadap pelarut namun rendah terhadap polimer. Proses presipitasi terjadi karena kelarutan antara polimer dan non pelarut rendah. Pada saat yang sama, kelarutan yang tinggi antara pelarut dengan non pelarut menyebabkan proses pergantian pelarut dengan non pelarut di beberapa titik sehingga terjadi *demixing*. Pembentukan *sublayer* pada membran asimetris dikendalikan oleh beberapa variabel di dalam larutan cetak, yaitu larutan yang akan digunakan sebagai material untuk membuat membran seperti komposisi, temperatur koagulasi, aditif organik dan anorganik (Mohammadi dan Saljoughi, 2009). Selain itu, pembentukan membran asimetris juga dipengaruhi oleh

polimer, pelarut dan non pelarut yang digunakan (Idris, dkk., 2007). Beberapa parameter yang terkait mekanisme pembentukan membran terhadap morfologi dan kinerja membran untuk proses pemisahan membran diantaranya adalah pengaruh konsentrasi polimer di dalam larutan cetak (Kim, *et al.*, 1996), tipe dari pasangan pelarut dan non pelarut (Kools, 1998), ketebalan membran (Vogrin, *et al.*, 2002) serta penambahan aditif (Kim dan Lee, 2003). Parameter-parameter di atas berpengaruh terhadap proses *demixing* yang terjadi secara instan maupun lambat di dalam bak koagulasi.

PES (*Polyethersulfone*) adalah salah satu polimer yang paling banyak digunakan sebagai material untuk membran ultrafiltrasi. Hal ini dikarenakan PES tahan terhadap temperatur tinggi, toleransi pH yang luas, memiliki kekuatan mekanik dan kimia yang baik serta mudah dalam pembuatan (Xu dan Qusay, 2004). Tipe membran asimetris umumnya digunakan untuk menambah kekuatan mekanik dari membran ultrafiltrasi. Teknik inversi fasa khususnya metode presipitasi imersi adalah teknik untuk membuat membran asimetris. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik membran PES yang dibuat melalui teknik inversi fasa dengan menggunakan variabel berupa jenis pelarut dan *Trans Membrane Pressure* (TMP).

2. METODE PENELITIAN

Polimer *polietersulfone* (PES) berasal dari *Solvay Process* India Ltd. digunakan sebagai material utama membran, N-metil Pyrrolidone (NMP) dan Dimetil Formamide (DMF) berasal dari *Merck* digunakan sebagai pelarut. Dekstran dengan berat molekul 6 kDa, 40 kDa, 70 kDa, 100 kDa dan 188 kDa dari *Sigma Aldrich* digunakan sebagai sampel larutan untuk menghitung MWCO membran. Bahan lainnya adalah aseton dan akuades (*distilled water*). Alat yang digunakan adalah seperangkat peralatan ultrafiltrasi, pipet ukur, timbangan analitik, plat kaca, gelas ukur 10 ml, erlenmeyer 50 ml, *magnetic stirrer*, motor pengaduk, *casting*

knife, bak koagulasi, *stop watch*, *water bath*, gas bertekanan dan lemari es.

Pembuatan Membran Asimetris PES/DMF dan PES/NMP

Pembuatan larutan cetak dilakukan dengan mencampurkan serbuk PES dengan pelarut NMP atau DMF dengan perbandingan komposisi 15:85(w/w). Campuran kemudian diaduk sampai homogen, ditandai oleh polimer yang telah larut. Pengadukan dilakukan selama 24 jam dengan kecepatan pengadukan 100 rpm. Perlakuan yang sama dilakukan untuk membuat membran dengan variasi berbeda. Hasil pengadukan berupa larutan bening yang selanjutnya disebut *dope* PES/NMP atau *dope* PES/DMF. Campuran atau *dope* tersebut disimpan di dalam lemari es selama ± 24 jam untuk menghilangkan gelembung udara.

Sebelum dicetak, campuran didiamkan hingga mencapai suhu ruang. Kemudian *dope* dituang ke atas pelat kaca untuk proses pencetakan dan diratakan ke seluruh permukaan kaca dengan menggunakan *casting knife*. Lapisan tipis yang terbentuk dibiarkan pada suhu ruang selama 15 detik untuk menguapkan pelarut. Selanjutnya, lapisan yang masih menempel di permukaan kaca dicelupkan ke dalam bak koagulasi yang berisi media pengendap berupa air murni yang berfungsi sebagai non pelarut pada proses presipitasi. Proses ini dibiarkan hingga lapisan membran terlepas dari pelat kaca. Temperatur bak koagulasi dijaga konstan pada temperatur ruangan 27°C selama proses presipitasi. Kemudian dilakukan proses *annealing* pada membran PES/NMP dan PES/DMF yang terbentuk dengan cara dipanaskan secara perlahan hingga suhu 70°C. Suhu tersebut dipertahankan selama 10 menit, selanjutnya membran siap digunakan untuk proses pemisahan.

Karakterisasi Membran dan Kinerja Membran

Karakteristik membran berupa uji morfologi yang dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM), uji permeabilitas air dan uji *Molecular Weight Cut-Off*

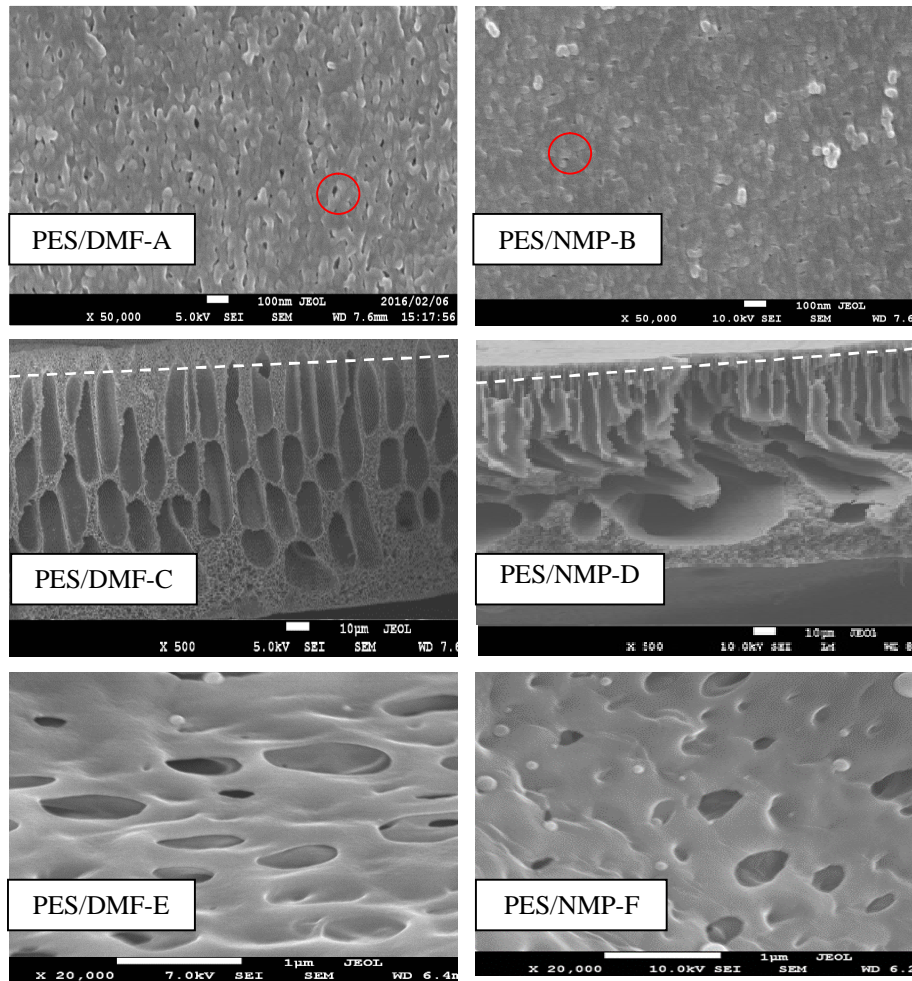
(MWCO). Kinerja membran ditentukan dengan mengukur fluks dan rejeksi larutan dekstran dengan beberapa variasi berat molekul.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Membran

Struktur permukaan membran, penampang melintang dan struktur makrovoid dari PES/NMP dan PES/DMF hasil analisis dengan alat SEM ditunjukkan pada Gambar 1. Struktur permukaan membran PES/NMP terlihat lebih rapat dibandingkan struktur membran PES/DMF. Membran dengan pelarut DMF pada permukaan atas memiliki ukuran pori-pori yang lebih besar. Gambar 1 adalah hasil foto SEM dengan ukuran pembesaran 50.000 kali yang menunjukkan ukuran pori yang berbeda antara hasil SEM kedua membran. Proses pembentukan permukaan atas pori-pori dipengaruhi oleh sifat termodinamika dari larutan cetak dan kinetika pada saat pembentukan membran. Saat proses pembentukan, membran dibiarkan mengalami penguapan selama 15 detik sehingga membentuk lapisan atas yang aktif. Tahap kedua dalam proses perendaman membran PES dapat dianggap stabil dimana pelarut dan non pelarut berdifusi di dalam bak koagulasi (Arthanareeswaran dan Starov, 2011). Laju difusi antara pelarut dan non pelarut di dalam bak koagulasi sangat mempengaruhi proses pembentukan *sublayer*. Apabila terjadi proses *demixing* secara spontan (*instantaneous demixing*) maka difusi pelarut ke bak koagulasi akan lambat, begitu juga terhadap difusi non pelarut ke dalam membran. Hal ini akan mengakibatkan bentuk dan ukuran pori yang lebih besar dibandingkan proses *demixing* yang terjadi secara lambat (*delayed demixing*).

Kelarutan atau parameter kelarutan antara pelarut dan non pelarut merupakan faktor penting di dalam pembentukan membran. Apabila perbedaan solubilitas antara pelarut dan non pelarut rendah maka non pelarut dapat berdifusi lebih mudah ke dalam lapisan film atau polimer. Hal ini akan menghasilkan kenaikan laju difusi



Gambar 1. Morfologi membrane PES yang dibuat dengan pelarut yang berbeda, (A) Struktur permukaan membran PES/DMF, (B) Struktur permukaan membran PES/NMP, (C) Struktur penampang melintang membran PES/DMF, (D) Struktur penampang melintang membran PES/NMP, (E) Struktur makrovoid permukaan membran PES/DMF, (F) Struktur makrovoid permukaan membran PES/NMP

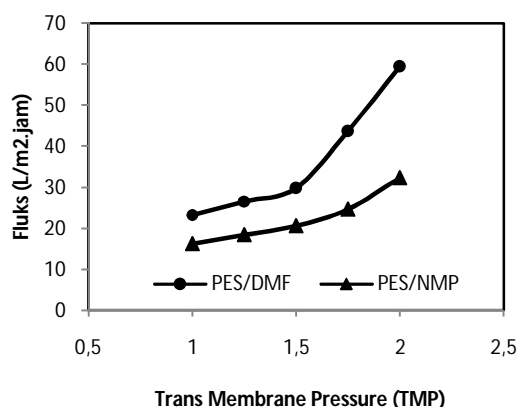
antara pelarut di dalam film polimer dengan non pelarut yang berada dalam bak koagulasi yang menyebabkan terjadi pemisahan secara spontan. Pemisahan tersebut secara normal dapat dilihat dari terbentuknya pori pada permukaan membran, dimana bentuk pori-pori seperti jari pada lapisan bawah (Madaeni dan Rahimpour, 2005). Perbedaan parameter solubilitas antara pelarut DMF lebih rendah dibandingkan dengan pelarut NMP, hal ini konsisten dengan karakter membran yang dihasilkan. Pada membran PES/DMF terjadi pemisahan spontan yang menghasilkan struktur permukaan (lapisan atas) membran yang lebih tipis dibandingkan dengan PES/NMP.

Hasil analisis SEM terhadap stuktur penampang melintang membran terlihat kedua membran merupakan membran asimetris yang terdiri dari dua lapis yang mana lapisan atas tipis dan rapat sedangkan lapisan bawah berpori yang berfungsi sebagai penyangga dan dapat memberikan ketahanan terhadap membran. Struktur pori pada bagian lapisan bawah terlihat berbeda, pada PES/DMF terlihat bentuk seperti jari. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Hatijah, dkk. (2008). Ketebalan bagian atas lapisan aktif berpori membran terbentuk dari NMP lebih besar dibandingkan dengan DMF. Bentuk makrovoid pori-pori di membran terbentuk

dari NMP dan DMF sebagai pelarut menunjukkan bahwa tingkat pembentukan makrovaid di lapisan bawah dari membran adalah tertinggi untuk pelarut DMF. Pelarut DMF memiliki fluks yang lebih tinggi karena karakteristik lapisan yang tipis dan pori-pori makrovaid besar.

Permeabilitas air murni merupakan salah satu karakteristik penting untuk membran apabila diaplikasikan pada industri. Nilai permeabilitas air murni diperoleh dengan mengukur fluks air murni yang melewati membran. Fluks adalah jumlah volume permeat yang melewati satu satuan permukaan luas membran dengan waktu tertentu dengan adanya gaya dorong, dalam hal ini berupa tekanan. Fluks merupakan karakterisasi penting bagi membran yang akan diaplikasikan di industri. Hubungan antara fluks air murni dengan *Trans Membran Pressure* (TMP) ditunjukkan pada Gambar 2 dimana kenaikan harga TMP berbanding lurus dengan fluks yang dihasilkan.

Gambar 2 mengindikasikan bahwa membran PES/DMF mempunyai nilai fluks yang lebih tinggi dibandingkan dengan membran PES/NMP. Membran PES/DMF mempunyai lapisan yang rapat (*dense layer*) lebih tipis dibandingkan dengan membran PES/NMP sehingga fluks yang melewati membran akan lebih tinggi.



Gambar 2. Permeabilitas air murni dari membran PES/DMF dan membran PES/NM

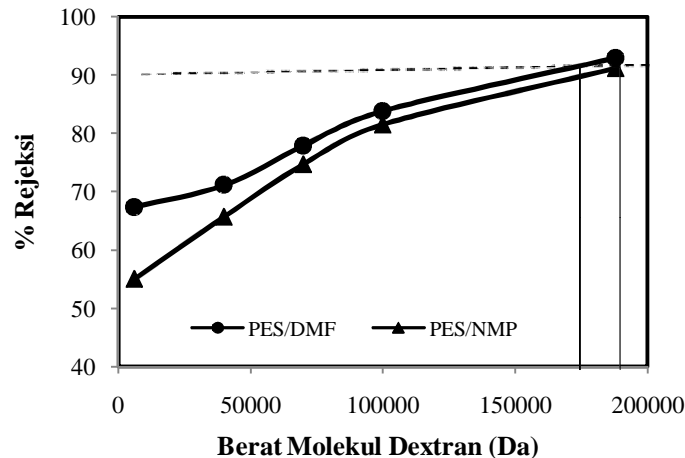
Nilai fluks terbesar diperoleh pada membran PES/DMF dimana pada tekanan 1 bar membran PES/DMF dan membran

PES/NMP menunjukkan fluks 23,27 L/m².jam dan 16,16 L/m².jam sedangkan pada tekanan 2 bar menunjukkan fluks sebesar 59,43 L/m².jam dan 32,25 L/m².jam.

Koefisien permeabilitas air murni (L_p) adalah kemampuan membran untuk melewatkan air murni berdasarkan tekanan operasi pada membran. Koefisien permeabilitas (L_p) menjadi salah satu faktor penentu karakteristik membran. Harga L_p diperoleh dari kemiringan (*slope*) grafik fluks terhadap tekanan operasi. Semakin tinggi nilai koefisien permeabilitas maka semakin mudah solut untuk melewati membran sehingga akan menghasilkan nilai fluks yang tinggi. Membran PES/NMP memiliki L_p 15,364 L/m².jam.bar dan membran PES/DMF memiliki L_p 35,769 L/m².jam.bar. Menurut Pratomo (2003), membran ultrafiltrasi mempunyai rentangan tekanan operasional pada 1,0-5,0 bar dengan fluks air murni antara 10-50 L/m².jam.bar sehingga kedua jenis membran yang dihasilkan dalam penelitian ini (PES/DMF dan PES/NMP) diklasifikasikan sebagai membran ultrafiltrasi.

Molecular Weight Cut-Off (MWCO)

MWCO adalah karakteristik dari pori membran yang berhubungan dengan rejeksi dari larutan dengan berat molekul tertentu. Persentase rejeksi dari senyawa tersebut dapat berada dalam range 100% sampai 0%, dimana 100% berarti semua solut akan terejeksi sedangkan 0% berarti tidak ada solut yang terejeksi. Secara umum, kriteria MWCO suatu membran dipilih apabila 90% dari suatu solut terejeksi oleh suatu membran (Bossu, K., 2006). Rejeksi dekstran MWCO dari PES/DMF dan PES/NMP dapat dilihat pada Gambar 3. Pada penelitian ini digunakan larutan dekstran dengan variasi berat molekul 6 kDa, 40 kDa, 70 kDa, 100 kDa dan 188 kDa. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa untuk membran PES/DMF memiliki nilai MWCO lebih rendah dibandingkan nilai MWCO membran PES/NMP. Nilai MWCO untuk membran PES/DMF adalah 177 Kda sedangkan membran PES/NMP adalah



Gambar 3. Profil *Molecular Weight Cut Off* dari membran PES/DMF dan membran PES/NMP

186 Kda. Nilai MWCO berbanding lurus dengan ukuran pori dari suatu membran (Idris, dkk., 2007). Hasil ini sesuai dengan struktur permukaan membran yang dihasilkan, membran PES/DMF memiliki struktur pori yang lebih besar dibandingkan membran PES/NMP.

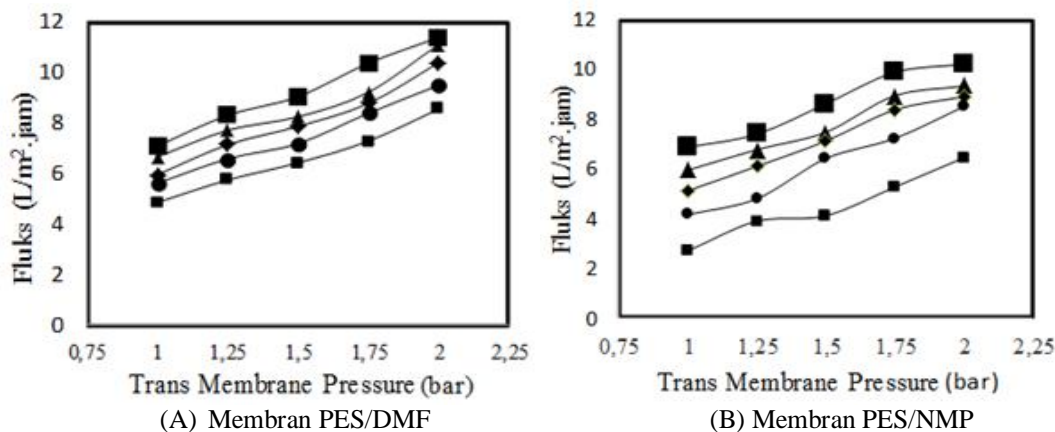
Kinerja Membran

Kinerja membran diukur untuk melihat pengaruh jenis pelarut terhadap fluks dan rejeksi dekstran dengan berbagai ukuran molekul pada beberapa TMP. Membran mempunyai kinerja yang baik apabila menghasilkan fluks yang tinggi dan rejeksi yang tidak terlalu rendah.

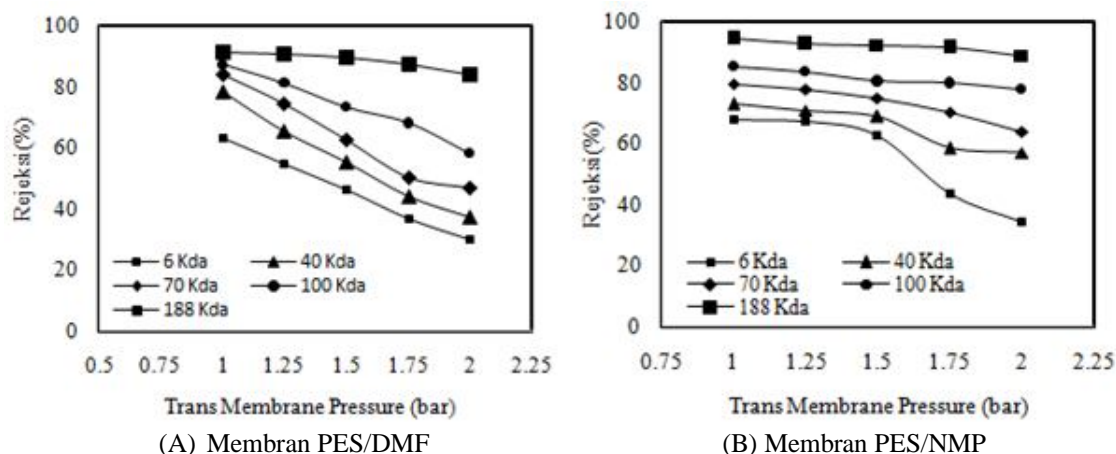
Pengaruh TMP terhadap Fluks Membran

Hubungan antara TMP terhadap fluks dekstran dengan berbagai berat

molekul ditunjukkan pada Gambar 4 yang memperlihatkan bahwa semakin tinggi tekanan yang diberikan maka nilai fluks yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan gaya dorong yang semakin besar sehingga semakin mendorong umpan melewati membran. Kenaikan berat molekul dekstran menyebabkan fluks semakin menurun. Kinerja membran ditentukan oleh karakter membran. Fluks yang dihasilkan oleh kedua membran konsisten dengan morfologi membran. Membran PES/DMF yang memiliki pori lebih besar dan lebih banyak dibandingkan membran PES/NMP menghasilkan fluks yang lebih besar dibandingkan membran PES/NMP. Fluks tertinggi diperoleh pada TMP 2 bar dan dekstran 6 Kda sebesar 11,4 L/m².jam untuk membran PES/DMF dan 10,2 L/m².jam untuk membran PES/NMP.



Gambar 4. Pengaruh TMP dan berat molekul dekstran terhadap fluks membran



Gambar 5. Pengaruh TMP dan berat molekul dekstran terhadap rejeksi membrane

Pengaruh TMP terhadap Rejeksi Membran

Rejeksi dipengaruhi oleh tekanan operasi dimana rejeksi menurun dengan bertambahnya TMP. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5 dimana persentase rejeksi larutan dekstran yang dihasilkan untuk semua larutan dekstran yang berbeda berat molekul menurun seiring dengan meningkatnya TMP. Membran PES/NMP memiliki rejeksi yang lebih tinggi yaitu 94,6% dibandingkan dengan membran PES/DMF sebesar 91,5%. Hal ini konsisten dengan kondisi morfologi membran dimana membran PES/NMP memiliki lapisan rapat (*dense*) yang lebih tebal dan juga pori-pori yang lebih rapat dibandingkan membran PES/DMF.

4. KESIMPULAN

Membran asimetris dari PES/NMP memiliki struktur pori yang lebih rapat dibandingkan membran PES/DMF sehingga permeabilitas air murni dan MWCO yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan membran PES/DMF. Kinerja membran PES/DMF terhadap pemisahan larutan dekstran memberikan nilai fluks yang lebih tinggi dari pada membran PES/NMP. Fluks tertinggi diperoleh pada TMP 2 bar dan dekstran 6 Kda yaitu sebesar 11,4 L/m².jam untuk membran PES/DMF dan 10,2 L/m².jam untuk membran PES/NMP. Rejeksi membran PES/NMP mencapai 94,6% sedangkan membran PES/DMF adalah 91,5%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada DP2M DIKTI yang telah mendukung pembiayaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Arthanareeswaran, G. & Starov, V.M. (2011). Effect of solvents on performance of polyethersulfone ultrafiltration membranes: Investigation of metal ion separations. *Desalination*, 267(1), 57-63.
- Boussu K., Van der Bruggen B., Volodin A., Van Haesendonck C., Delcour J.A, Van der Meeren P. (2006). Characterization of commercial nanofiltration membranes and comparison with self-made polyethersulfone membranes. *Desalination*. 191(1), 245-53.
- Gierszewska, M. & Jadwiga, O.C. (2016). Chitosan-based membranes with different ionic crosslinking density for pharmaceutical and industrial applications. *Carbohydrate Polymers*, 153, 501-511.
- Hatijah, B., Ahmad, F.I. & Madzlan, A. (2008). Effect of Different Solvent in The Preparation of Polyethersulfone (PES)-Ag Polymer Composite. *Jurnal Teknologi*, 49, 133-140.
- He, C. & Radisav, D.V. (2016). Application of microfiltration for the treatment of Marcellus Shale flowback water: Influence of floc breakage on membrane fouling. *Journal of Membrane Science*, 510, 348-354.

- Huang, X., Weiping, W., Liu, Y., Wang, H., Zhibing, Z., Wenling & F., Lei, L. (2015). Treatment of oily waste water by PVP grafted PVDF ultrafiltration membrane. *Chemical Engineering Journal*, 273, 421-429.
- Idris, A., Zain, N.M. & Noordin, M.Y. (2007). Synthesis, characterization and performance of asymmetric polyethersulfone (PES) ultrafiltration membranes with polyethylene glycol of different molecular weights as additives. *Desalination*, 207(1-3), 324-339.
- Kim, H.J., Tyagi, R.K., Fouda, A.E. & Jonasson, K. (1996). The kinetic study for asymmetric membrane formation via phase-inversion process. *Journal of applied polymer science*, 62(4), 621-629.
- Kim, I. C. & Lee, K. H. (2003). Effect of various additives on pore size of polysulfone membrane by phase-inversion process. *Journal of applied polymer science*, 89(9), 2562-2566
- Kools, W.F.C. (1998). Membrane formation by phase inversion in multicomponent polymer systems. Mechanisms and morphologies. Universiteit Twente.
- Madaeni, S.S. & Rahimpour, A. (2005). Effect of type of solvent and non-solvents on morphology and performance of polysulfone and polyethersulfone ultrafiltration membranes for milk concentration. *Polymers for Advanced Technologies*, 16(10), 717-724.
- Mohammadi, T. & Saljoughi, E. (2009). Effect of production conditions on morphology and permeability of asymmetric cellulose acetate membranes. *Desalination*, 243(1-3), 1-7.
- Mulder, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology. Kluwer Academic Publisher. Netherland.
- Pratomo, A. & Heru. (2003). Pembuatan dan Karakterisasi Membran Komposit Polisulfon Selulosa Asetat Untuk Proses Ultrafiltrasi. *Jurnal Pendidikan Matematika dan Sains*, 2003, 168-173.
- Vogrin, N., Stropnik, Črtomir, S., Vojko, M. & Milan, B. (2002). The wet phase separation: The effect of cast solution thickness on the appearance of macrovoids in the membrane forming ternary cellulose acetate/acetone/water system. *Journal of Membrane Science*, 207(1), 139-141.
- Xu, Z.L. & Qusay, F.A. (2004). Polyethersulfone (PES) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared by PES/non-solvent/NMP solution. *Journal of Membrane Science*, 233(1), 101-111.